



烧结新型环冷机余热发电技术创新优化

兰向东¹, 周响球²

(1. 成都市通用工程技术有限责任公司, 四川 成都 610000;

2. 湖南中冶长天节能环保技术有限公司, 湖南 长沙 410205)

摘要:为降低企业能源成本和减少环境污染,优化环冷机余热回收系统与提高余热利用效率,进一步提升余热发电系统的综合性能至关重要。文章对烧结新型环冷机的工作原理及其余热发电技术的核心要素进行分析,探讨了提升余热资源品质的具体方法,包括密封形式改进、保温结构优化、冷却面积调整、冷却风量与流速优化等。在此基础上,提出系统性技术创新优化方法,包括取风系统、循环回风系统、锅炉设备、汽轮机组及辅助系统的参数优化,以及取风罩结构和布风总管的优化设计。优化结果显示:热风回收比例提高至60%以上,取风量增加10%~20%,取风平均温度达到380℃以上,余热锅炉热效率提升至73%,汽轮发电机组单耗降低约11%,系统综合热效率达到17%以上,烧结环冷机吨矿发电指标可以提高到30 kW·h/t以上。

关键词:环冷机; 余热发电; 双压余热锅炉; 汽轮机; 热风循环; 分段取回风技术

中图分类号:TF046.4;TK11*5

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)06-0089-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.06.080

Technological innovation and optimization of waste heat power generation by sintering new ring cooler

LAN Xiangdong¹, ZHOU Xiangqiu²

(1. Chengdu General Engineering Technology Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China;

2. Zhongye Changtian Energy Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: In order to reduce corporate energy costs and minimize environmental pollution, optimizing the waste heat recovery system of ring cooling machines and enhancing the efficiency of waste heat utilization are critical for improving the overall performance of waste heat power generation systems. The article analyzes the working principles of new-type ring cooling machines and the core elements of their waste heat power generation technology, and explores specific methods to improve the quality of waste heat resources, including sealing form improvement, insulation structure optimization, adjustment of cooling area, and optimization of cooling air volume and flow velocity. Based on this, the article proposes a systematic approach to technological innovation and optimization, covering parameter optimization of subsystems such as the air intake system, circulating return air system, boiler equipment, steam turbine units, and auxiliary systems, as well as optimized design of the air intake hood structure and air distribution main duct. The optimized results show: the proportion of hot air recovery increased to above 60%, the air intake volume increased by 10% ~ 20%, the average air intake temperature reached above 380 °C, the thermal efficiency of the waste heat boiler improved to 73%, the specific consumption of the steam turbine generator decreased by approximately 11%, the system's comprehensive thermal efficiency reached above 17%, and the power generation index per ton of sintered ore from the ring cooling machine can be increased to over 30 kW·h/t.

收稿日期: 2025-05-06

作者简介: 兰向东(1968—),男,工程师,从事冶金动力及工业企业节能技术研究与设计应用。

通信作者: 周响球(1981—),男,高级工程师,从事冶金动力及环保热电技术研究与设计。

Key words: ring cooler; waste heat power generation; double pressure waste heat boiler; turbine; hot air circulation; segmented return air technology

烧结新型环冷机余热发电技术是钢铁行业实现节能减排的重要途径之一。随着全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严峻,如何高效回收和利用工业余热资源成为研究热点^[1]。烧结环冷机作为烧结矿冷却的关键设备,其排出的高温热风蕴含大量可利用的余热资源。通过优化余热发电系统,可以显著提高余热资源的利用率,减少能源浪费和污染物排放,同时降低企业的能源成本,提升经济效益^[2-3]。因此,研究烧结新型环冷机余热发电技术的优化方法,对于推动钢铁行业的绿色可持续发展具有重要的现实意义。

近年来,国内外学者和企业 在烧结余热发电技术方面进行了大量研究和实践。丁毅等^[5]研究了传统环冷机的余热回收系统,提出了通过改进风罩结构和增加取风量来提高余热利用率的方法,但受限于设备结构和余热品质,发电效率提升有限。张伟等^[6]优化了余热锅炉的设计参数,通过调整蒸汽压力和温度,显著提高了余热锅炉的热效率,但未充分考虑新型环冷机余热资源分布的变化对系统整体性能的影响。文献[7]探讨了热风循环利用技术在烧结环冷机中的应用,提出通过循环回风减少热废气排放,但其研究主要集中在单一环节的优化,未能系统性地解决新型环冷机余热发电系统中存在的多方面问题。

本文将针对烧结新型环冷机余热发电系统中存在的余热资源回收效率低、系统参数匹配不合理、设备结构优化不足等问题,提出一种系统性优化方法。本文将从机械结构、流体力学、工程热力学等多个方面进行改进,包括优化取风系统参数、改进循环回风系统设计、提升锅炉和汽轮机组的运行效率等,以进一步提高余热发电系统的热效率和发电量。通过本文的研究,将为烧结新型环冷机余热发电技术提供更高效的解决方案,解决传统系统中余热资源利用率低、系统运行不稳定等问题,推动钢铁行业节能技术的进一步发展。

1 烧结新型环冷机余热发电技术原理

1.1 环冷机工作原理

烧结新型环冷机是通过冷却风对热烧结矿进

行受控降温的环形槽车式换热设备,烧结机上完成烧结过程的高温矿(平均温度在 600 ~ 800 °C 之间)经单辊破碎机制备成一定粒径的块状异形多孔料,然后经布料装置均匀分布到环冷机台车篦板上,从篦板下进入台车的冷却风,对台车上一定厚度(1.4 ~ 1.5 m)均布的热烧结矿进行受控冷却,冷却风通过矿风热交换后变成热风,热风从台车上部风罩汇集排出,烧结矿随台车沿环冷机圆周运动,直至完成冷却(100 ~ 120 °C)后排入输料皮带送走;沿上部风罩排出的热风温度在圆周上随矿温下降逐渐降低,风罩内符合余热利用条件的中高温热风被回收用于产汽发电,低温热风送往烧结机点火炉助燃或热风烧结工艺使用。

1.2 余热发电原理

1.2.1 余热资源来源

烧结新型环冷机上部排出热风温度沿台车运行方向从高到低分布,最高温区热风温度可达 560 °C 以上,排矿点风温约为 80 ~ 100 °C;相较传统环冷机,新型环冷机前端热风温度平均提高约 120 °C 左右,余热资源品质更高,可用余热资源量更大。

1.2.2 余热回收及发电原理

余热发电系统根据节能指标先进、投入产出比高、综合经济性好的原则,合理选取余热回收系统及热力参数,收集环冷机排出的满足余热回收温度条件的全部热风;再利用热风携带能量与热媒进行间接热交换,对余热回收系统主要设备—双压余热锅炉内的饱和蒸汽、炉水、除氧水、凝结水和除盐水进行加热,最终产出两种压力级别的过热蒸汽;然后利用两条蒸汽管道,将不同压力的过热蒸汽分别送入补汽式汽轮机不同进汽口,在汽轮机内共同膨胀做功,驱动发电机组旋转发电。

1.2.3 余热资源循环利用原理

余热锅炉排风与汽轮机排汽均循环使用。锅炉排出低温风通过循环风机加压送回环冷机,再次与热烧结矿进行换热,获取高品质余热资源;该技术一方面保证废气不外排,另一方面还可以增加环冷机冷却风热焓,从而提高环冷机出口余热废气温度,达到增加余热回收系统热风回收量

约15%~20%的目的;同时,热风冷却还有利于提高烧结矿理化指标,减少返矿率。

汽轮机排汽在凝汽器内降温变成凝结水,通过凝结水泵加压后返送余热锅炉循环使用,做到对能量和水资源的重复利用。

2 烧结新型环冷机提升余热资源品质的方法

2.1 机械结构的变化

2.1.1 密封形式

烧结新型环冷机上、下密封形式的变化将漏风率控制到了5%以内,较传统环冷机20%以上的漏风率减少75%以上,为提升矿风换热效率并高效收集余热创造了良好的条件。

2.1.2 环冷机保温结构

新型环冷机对台车与风罩均进行了保温结构设计,将台车与风罩表面温度降低到50℃以下,使环冷机散热损失降低了80%以上,为回收更多余热创造了条件。

2.1.3 环冷机有效冷却面积

新型环冷机料层厚度的增加,使得同产量环冷机所需冷却面积减小,相同面积的新型环冷机较传统环冷机设计余量更大,便于企业生产者更合理地调节烧结矿冷却速度,给矿风换热效率提高创造了更好的条件,有利于余热废气焓值的提升,从而增加系统余热利用效率。

2.2 流体力学方面的变化

新型环冷机冷却风量减少,料层冷却风平均流速降低,单位料层阻力减小,冷却风穿过料层时间延长,促使矿风换热更充分,单位冷却风吸收热量更多。

2.3 工程热力学方面的变化

环冷机出口热废气最高风温和平均风温的提高,为余热锅炉产生更高参数的蒸汽创造了条件,为系统整体热效率的提升打下了基础。

2.4 以上变化对余热发电的影响

新型环冷机的以上几点变化给余热发电系统带来的直接影响如下。

(1) 环冷机取风段延长,每段热风罩取风量减少,总取风量增加10%~20%。

(2) 环冷机可取热风平均温度提高约15%~

25%。

(3) 新型环冷机热废气最高温度较传统环冷机提高约20%~30%。

以上3点主要变化造成余热回收量和余热品质的同步提升,为进一步提高余热锅炉效率、蒸发量、蒸汽压力和蒸汽温度,从而大幅提高余热电站发电量创造良好的条件。

3 烧结新型环冷机余热发电技术创新优化方法

根据烧结新型环冷机余热资源条件的变化,结合现有烧结余热发电系统存在的问题,可以提出一种创新优化方法,包括改进热风回收系统、余热锅炉系统、锅炉排气循环利用系统、汽轮发电机系统、循环水冷却系统、化学水系统、发输电系统及智能控制系统等,从而提高余热回收与利用效率,增加余热发电系统发电功率和供电功率。

3.1 技术创新优化方向

根据上文所述余热资源各方面的主要变化,仔细分析计算比选后,选择技术优化方向如下。

(1) 提高余热回收取风比例与取风量,延长环冷机取风罩长度。

(2) 根据取风总热量变化,选择合理的锅炉蒸发量及汽轮机装机容量。

(3) 根据取风平均温度变化,提高双压余热锅炉和补汽式汽轮机压力等级。

(4) 根据取风最高温区变化,提高系统过热蒸汽设计温度。

(5) 延长热风循环回风段长度,确保余热锅炉排风全循环。

3.2 技术创新优化方法

3.2.1 系统参数优化

(1) 取风系统参数优化。

1) 取风比例。根据新型环冷机条件下的烧结矿冷却风区域温度分布曲线和新的热力系统参数,确定取风温度下限点,从而计算出热风取风比例在60%以上。

2) 取风量。根据烧结矿冷却热平衡计算,结合取风比例参数和环冷机冷却能力,当烧结矿平均温度在700~800℃之间时,单位烧结饼取风量

约为 800 ~ 900 Nm³/t。

3) 取风温度。根据环冷机进口矿温、冷却速度、冷却风量、冷却风温及热力系统选定压力参数计算, 烧结新型环冷机前段最高取风温度在 560 ℃ 以上, 取风末段风温在 200 ℃ 以上, 平均取风温度在 380 ℃ 左右。

4) 取风压力。为保证废气不泄漏, 同时兼顾余热利用效率的因素, 环冷机取风罩距风管入口远端压力控制在 0 ~ -20 Pa 为宜, 风管入口处压力控制在 -100 Pa 以内为宜。

(2) 循环回风系统参数优化。

1) 循环回风比例及风量。余热锅炉所有排气全部进入循环回风系统重复使用, 减少热污染物排放的同时回收更多的余热资源; 循环热风量较冷风冷却标态风量大 10% ~ 20%, 循环回风比例与取风比例基本一致。

2) 循环回风温度。由于循环回风量与循环风比例较传统环冷机高, 循环冷却段冷却强度降低, 环冷机冷却余量被动减少; 为保证烧结矿冷却效果, 余热锅炉设计排气温度较传统环冷机设计温度降低约 20 ℃, 实际运行温度按 110 ℃ 左右控制为宜。

3) 循环回风压力。新型环冷机冷却风总管设计压力较传统环冷机低 40% 以上, 因此, 循环回风压力应考虑总管设计压力、循环回风段冷却风量及风温变化, 调整循环回风段总管运行压力, 以保证热风循环冷却效果与原设计接近。

(3) 锅炉设备参数优化。因余热利用取风量、平均温度与最高温度均较原系统有不同幅度提升, 使得该余热资源更高效利用的锅炉容量和蒸汽参数相应发生变化; 经计算比较, 新锅炉设计容量提升约 30%, 高参数蒸汽参数从低压提升至次中压, 压力 2.45 MPa、温度 400 ℃; 低参数蒸汽参数较原设计也有一定提升, 压力在 0.5 MPa 左右, 温度在 200 ℃ 左右。

(4) 汽轮机组参数优化。根据余热锅炉参数变化, 汽轮发电机组参数同步进行调整优化, 使蒸汽能量充分转化为电能; 优化后发电机组能力较原系统提升约 40% 左右。

(5) 辅助系统参数优化。随着锅炉与汽轮发

电机组各参数变化, 所有辅助系统参数均需优化, 与主体设备变化要求相适应。

3.2.2 结构形式优化

(1) 取风系统优化。

新型环冷机取风罩分为三段: 一段取风约占总取风量的 30%, 用于蒸汽过热与蒸发, 较高的风温对蒸汽过热度有更好的保证, 从而提高热电转换效率; 二段取风约占总取风量的 40%, 三段收取剩余可取风量, 均用于锅炉蒸发。

根据取风罩不同位置热风流量变化趋势, 设计梯形风罩, 控制风罩负压变化的均匀性和热风流动的平稳性, 保证烧结矿冷却可控性更高。

在环冷机进料段合适位置设置活动密封板, 减少冷风吸入; 每个取风段中间设置活动隔板, 减少各段取风相互干涉, 从而有效控制各段取风流量与温度的稳定性。

(2) 循环回风系统优化。

将热风循环段布风总管设置分段阀, 根据计算设置不同数量的进风支管, 支管设置调节阀, 动态调节每段总管进风量, 确保烧结矿的冷却效果, 同时产生指标更优的热风供余热回收使用。

3.2.3 运行控制优化

随着环冷机入口烧结矿量及矿温变化, 动态调节循环总风量、各取风和布风段流量、各段温度与压力, 随动调节余热锅炉蒸汽流量、温度及压力, 保证余热发电系统供电量最大。

3.3 优化工艺系统

根据以上优化方法, 设计烧结环冷机余热回收工艺流程图如图 1 所示。

图中环冷机热风从上部三段取风管送入余热锅炉, 一段高温热风单独送入余热锅炉过热段, 二、三段中温热风并管送入余热锅炉蒸发段, 与过热段排风混合后进行气水热交换, 余热锅炉全部排风通过循环风机加压后送回环冷机各冷却段布风管, 与环冷机台车内热矿换热后再次利用。

余热锅炉产生两种压力级别的过热蒸汽, 分别通过两条管线送往汽轮机前部与中部进汽口, 在汽轮机内共同膨胀做功, 驱动汽轮机带动发电机同步旋转发电; 做功后的乏汽在凝汽器内冷却后凝结成水, 凝结水通过凝结水泵加压后送回余

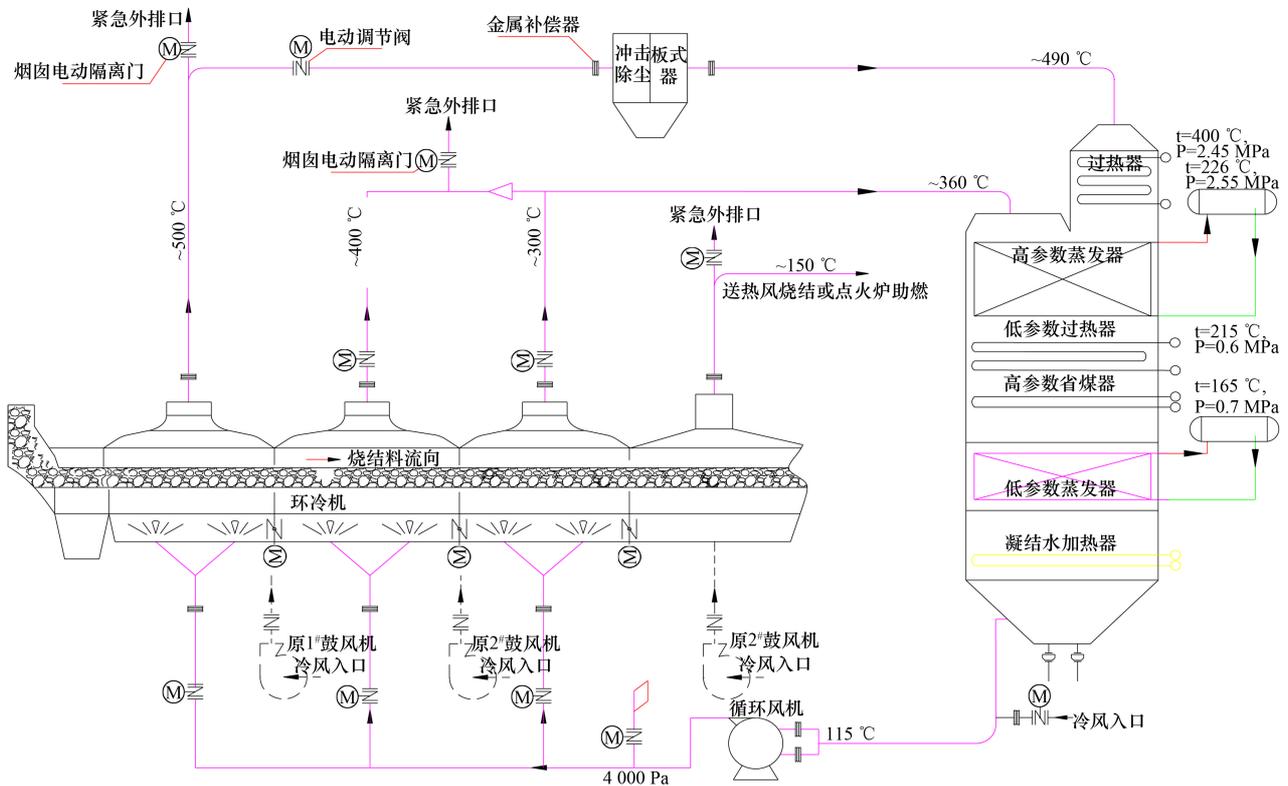


图1 烧结环冷机余热回收工艺流程

热锅炉重新产生蒸汽, 再次循环使用。

以上两个流程及过程参数的控制优化是本技术的核心所在, 只有对全流程的过程控制做到最优化, 才能使该技术的应用效果做到最佳。

4 优化效果分析

4.1 优化前后性能对比

4.1.1 余热回收性能对比

该技术优化实施后, 可以促使正常生产时热风回收比例提高至 60% 以上, 较传统技术取风比例提高约 30%, 取风量提升 10%~20%; 取风平均温度达到 380 °C 以上, 较传统技术取风温度提高约 15%; 回收总热量提高 30% 以上。

4.1.2 余热利用性能对比

随着余热回收性能的提升, 余热利用效率同步提高, 各余热利用性能参数如下。

余热锅炉热效率从 65% 左右提高到 73% 左右, 提升幅度约为 12%; 汽轮发电机组单耗显著下降, 综合汽耗从 5.45 kg/kW·h 降低到 4.85 kg/kW·h, 降幅约为 11%。

4.1.3 综合对比

综上所述, 该新技术应用后, 烧结余热发电

系统效率达到 17% 以上, 增加发电量 30% 以上, 烧结环冷机吨矿发电指标可以提高到 30 kW·h/t 以上。

4.2 优化效果评价

优化后的余热发电系统在节能、环保及经济性等方面均有明显提高, 其中, 吨烧结矿按平均发电量提升 7 kW·h/t 计算, 节约标准煤约 2.45 kg/t, 工序能耗下降约 5%, 节能效益显著; 减少 CO₂ 排放约为 6.98 kg/t, 减少粉尘排放量约为 0.5 kg/t, 减少热废气直接外排量约为 500 Nm³/t, 环保效益明显。

5 结论及发展方向

5.1 结论

烧结新型环冷机余热发电技术创新优化研究是近几年钢铁企业重要的节能技术创新, 参与企业与技术单位众多, 局部创新应用实例较多, 但节能指标提升有限, 技术创新性较小; 系统性解决新型环冷机余热发电存在问题的工程实例尚未出现, 本技术的推进与实施将极大促进烧结余热发电技术进步, 为企业大幅降低工序能耗与减少

环境污染起到极大推动作用,全行业年节能(标煤)可达 245×10^4 t 以上,减排 CO_2 达 700 万吨左右,社会效益显著;本技术可降低烧结矿能源成本约 4 元/t,全国钢铁企业年总节能费可达 40 亿元以上,经济效益明显。

5.2 发展方向

该技术动态调节范围广,适应生产波动幅度大,对自动控制要求较高。所以,本技术后期将重点研发人工智能调节系统,对烧结工艺生产与余热发电生产进行智能化调控,确保生产的安全性、稳定性和经济性,减轻职工劳动强度,合理配置企业劳动定员,为国家节能减排和企业降本增效做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 烧结余热回收利用技术规范:GB/T 32962—2016 [S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [2] 烧结机余热回收利用成套装置技术规范:JB/T 11381—2013[S]. 北京:机械工业出版社,2013.
- [3] 小型火力发电厂设计规范 GB 50049—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
- [4] 张慧宁,郭奠球. 烧结设计手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1990.
- [5] 丁毅,史德明. 马钢烧结带冷机余热发电[J]. 冶金能源,2007(1):49-53.
- [6] 张伟,王强. 烧结环冷机余热分级回收系统设计与应用[J]. 钢铁,2020,55(8):89-95.
- [7] 中国金属学会. 钢铁企业余热余能高效回收技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2015.
- [8] 一种烧结环冷机余热发电系统的优化控制方法:201910123456.7[P]. 马鞍山:马钢股份有限公司,2019.
- [9] 孔珑. 工程流体力学[M]. 北京:中国电力出版社,2014.
- [10] 陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2024.
- [11] 童钧耕,王丽伟. 工程热力学[M]. 北京:高等教育出版社,2022.